

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.15.003

C/N 值对短时曝气 SBR 高标准脱氮除磷效能的影响

龚本洲^{1,2}, 周炯¹, 刘石虎¹, 王佳乐¹, 周健¹

(1. 重庆大学 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400045; 2. 长江勘测规划设计研究有限责任公司, 湖北 武汉 430010)

摘要: 针对现有城镇污水脱氮除磷效率低、碳源对深度脱氮除磷制约等突出问题,提出了基于短时曝气 SBR 的城镇污水高标准脱氮除磷技术,考察了进水 C/N 值对短时曝气 SBR 脱氮除磷效能的影响。结果表明,进水 C/N 值对短时曝气 SBR 的脱氮除磷效能影响显著。当温度为 25℃, SRT 为 40 d, 进水 C/N 值分别为 4、5、6、7 时,系统对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的平均去除率分别为 83.3%、99.3%、99.4%、99.5%,对 TN 的平均去除率分别为 58.8%、82.6%、88.1%、93.8%,对 TP 的平均去除率分别为 14.6%、54.5%、76.6%、97.5%。当进水 C/N 值为 7 时,系统出水 COD、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TN、TP 平均浓度分别为 18、0.20、2.46、0.13 mg/L, COD、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 与 TP 指标满足地表水 IV 类水质标准, TN 指标接近地表水 V 类水质标准。

关键词: 城镇污水; SBR; 短时曝气; C/N 值; 高标准脱氮除磷

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)15-0013-05

Effect of C/N Ratio on High-standard Nitrogen and Phosphorus Removal Efficiency of SBR with Short-time Aeration

GONG Ben-zhou^{1,2}, ZHOU Jiong¹, LIU Shi-hu¹, WANG Jia-le¹, ZHOU Jian¹

(1. Key Laboratory of Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment <Ministry of Education>, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 2. Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research, Wuhan 430010, China)

Abstract: A series of problems existed in sewage treatment such as low nitrogen and phosphorus removal efficiency and shortness of carbon source. A high-standard nitrogen and phosphorus removal technology based on SBR with short-time aeration was proposed for sewage treatment, and the effect of influent C/N ratio on nitrogen and phosphorus removal efficiency of the SBR system was investigated. Results showed that C/N ratio had a significant effect on the nitrogen and phosphorus removal efficiency of the SBR with short-time aeration. When the temperature was 25℃, the SRT was 40 days and the influent C/N ratios were 4, 5, 6 and 7, the removal rates of $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ were 83.3%, 99.3%, 99.4% and 99.5%, respectively, the removal rates of TN were 58.8%, 82.6%, 88.1% and 93.8%, respectively, and the removal rates of TP were 14.6%, 54.5%, 76.6% and 97.5%, respectively. When the influent C/N ratio was 7, the average concentrations of COD, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$, TN and TP in the effluent were 18 mg/L, 0.20 mg/L, 2.46 mg/L and 0.13 mg/L, respectively. The concentrations of

COD, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ and TP in the effluent could meet the level IV standard of surface water, and the TN concentration in the effluent was close to the level V standard of surface water.

Key words: sewage; SBR; short-time aeration; C/N ratio; high-standard nitrogen and phosphorus removal

城镇污水处理厂尾水常常排入几乎无环境容量的受纳水体,尽管城镇污水经过处理后已达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级B或一级A标准,但相对于地表水环境而言,尾水对于受纳水体依然是点污染源。以氨氮为例,即使是达到了GB 18918—2002的一级A标准(5 mg/L),其依旧是《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)V类标准限值(2 mg/L)的2.5倍。由此可见,对城镇污水进行基于地表水水质标准的高标准处理,是我国城镇污水处理的必然趋势。

相对于增加深度处理设施,通过优化污水处理厂运行的非工程途径,进一步提升污水处理厂的脱氮除磷效能更具有现实意义^[1-3]。陈立等人^[4]研究发现,通过取消初沉池,系统的TN去除率可以提高5%~20%,使污水处理厂出水水质从GB 18918—2002的一级B标准达到一级A标准;王滢等人^[5]研究发现,设置前置预缺氧池和前置厌氧区,可利用回流污泥内源反硝化作用提升系统对TN的去除率,同时应用反硝化吸磷技术,使污水处理厂出水水质满足GB 18918—2002的一级A标准;许德超等人^[6]在SBR中以静置段代替传统厌氧段,使TN去除率从77%提升至83.5%;郭海燕等人^[7]在SBR中加载移动床生物膜,使系统的TN、TP去除率分别提升了10.9%和4.1%。虽然上述措施在一定程度上减少了污水处理厂运行过程中碳源的损耗,强化了氮、磷的去除,但是节省碳源能力有限,出水水质与地表水V类水质标准依然存在较大差距。针对上述问题,为了减少污水处理过程中碳源的损耗,笔者提出了一种基于短时曝气SBR的城镇污水高标准脱氮除磷技术,重点考察了进水C/N值对短时曝气SBR系统脱氮除磷效能的影响,以期为城市污水厂高标准深度处理提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 实验装置

实验用SBR装置如图1所示,长25 cm、宽20 cm、高35 cm,有效容积为15 L;通过蠕动泵进水,采用空气泵经曝气砂头供气,供气量由气体流量计计

量;同时,反应器设置搅拌装置,采用恒温箱控制反应器温度,由可编程控制器控制运行工况。

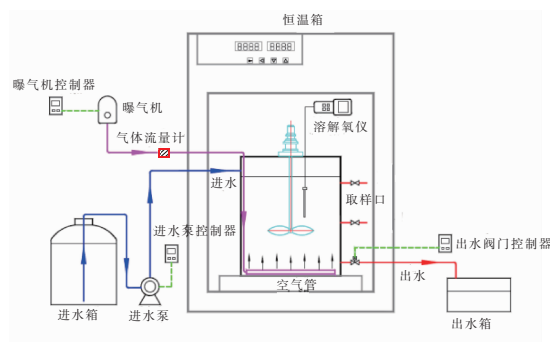


图1 实验装置

Fig.1 Schematics of experimental equipment

1.2 实验方法

采用4组SBR反应器(记作1#~4#)进行平行对比实验,考察进水C/N值对短时曝气SBR系统脱氮除磷效能的影响。实验接种污泥取自某AAO工艺的城镇污水处理厂。反应温度为 $(25 \pm 1)^\circ\text{C}$,反应器排水比为0.4,泥龄为40 d,反应器运行工况为:进水2 min→厌氧58 min→好氧40 min→缺氧120 min→好氧20 min→缺氧100 min→好氧20 min→沉淀118 min→排水2 min,好氧段DO浓度为2~3 mg/L。

1.3 实验用水

采用乙酸钠、淀粉、奶粉、 NH_4Cl 和 KH_2PO_4 配制实验进水,以模拟城镇污水处理厂进水。为了控制不同的进水C/N值,1#~4#反应器的进水COD浓度分别为154~168、193~209、231~252、272~291 mg/L, TN浓度均为38~42 mg/L,相应的C/N值分别为4、5、6、7, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度均为36~40 mg/L, TP浓度均为4.8~5.4 mg/L。水质指标均采用国家标准方法测定。

2 结果与讨论

2.1 C/N值对短时曝气SBR脱氮除磷效能的影响

不同进水C/N值条件下,短时曝气SBR系统的脱氮除磷效能如图2所示。可知,随着C/N值的增加,反应器对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TN、TP的去除率亦增加;系统运行20 d后,各出水指标趋于稳定,当C/N值分

别为 4、5、6、7 时,出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 平均浓度分别为 6.34、0.28、0.22、0.20 mg/L,去除率分别为 83.3%、99.3%、99.4%、99.5%;出水 TN 平均浓度分别为 16.45、6.97、4.77、2.46 mg/L,去除率分别为 58.8%、82.6%、88.1%、93.8%;出水 TP 平均浓度分别为 4.27、2.28、1.17、0.13 mg/L,去除率分别为 14.6%、54.5%、76.6%、97.5%。当 C/N 值为 4 时,系统出水氮、磷浓度较高,均超过了 GB 18918—2002 的一级 A 排放标准;随着 C/N 值的增加,系统出水水质逐渐提升,当 C/N 值为 7 时,系统出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 与 TP 指标满足《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)的Ⅳ类水质标准,TN 指标也接近 GB 3838—2002 的Ⅴ类水质标准。上述结果表明,进水 C/N 值对短时曝气 SBR 系统的脱氮除磷效能影响十分显著。

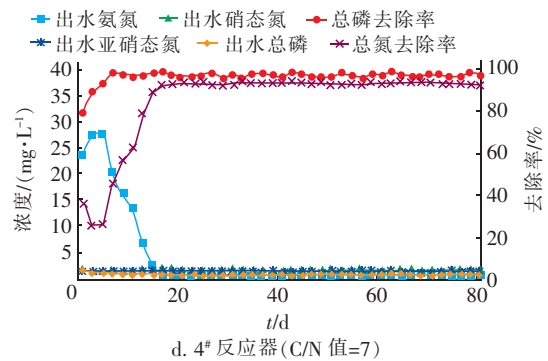
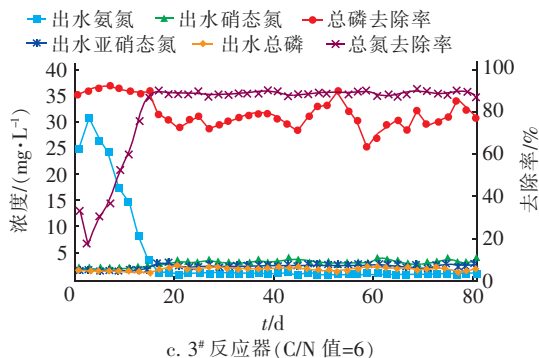
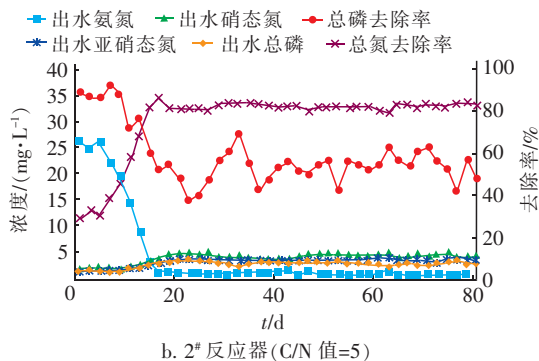
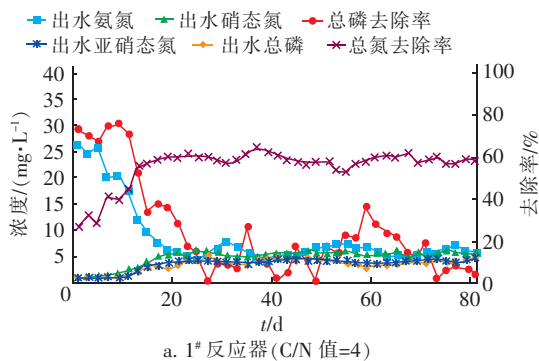
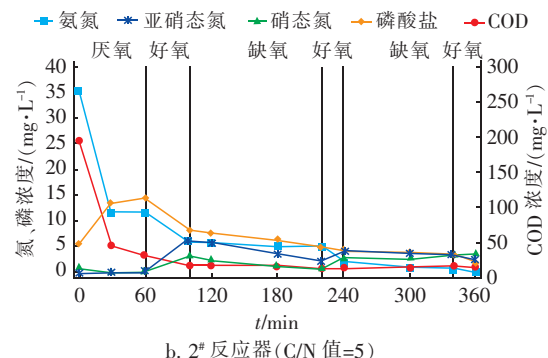
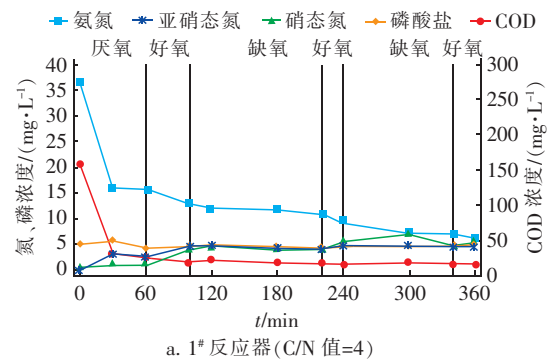


图 2 不同 C/N 值下反应器对氮、磷的去除效果

Fig. 2 Removal effect of nitrogen and phosphorus under different C/N ratios

2.2 C/N 值对典型周期内氮、磷去除规律的影响

C/N 值对短时曝气 SBR 系统典型周期内氮、磷去除规律的影响如图 3 所示。可知,在反应器厌氧 60 min 时段,系统利用进水中的碳源实现磷的释放。在进水 C/N 值为 4 的反应器中,由于进水中碳源较少,系统反硝化不充分,在厌氧结束时,系统中残留较多的 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ (2.37 mg/L) 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ (0.89 mg/L),使系统没有多余的碳源用于释磷,厌氧结束时系统中的 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 浓度仅为 4.31 mg/L。随着进水碳源的增加,在进水 C/N 值为 5、6、7 的反应器中,厌氧结束时 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 浓度逐渐增加,分别为 14.71、18.07、23.59 mg/L。



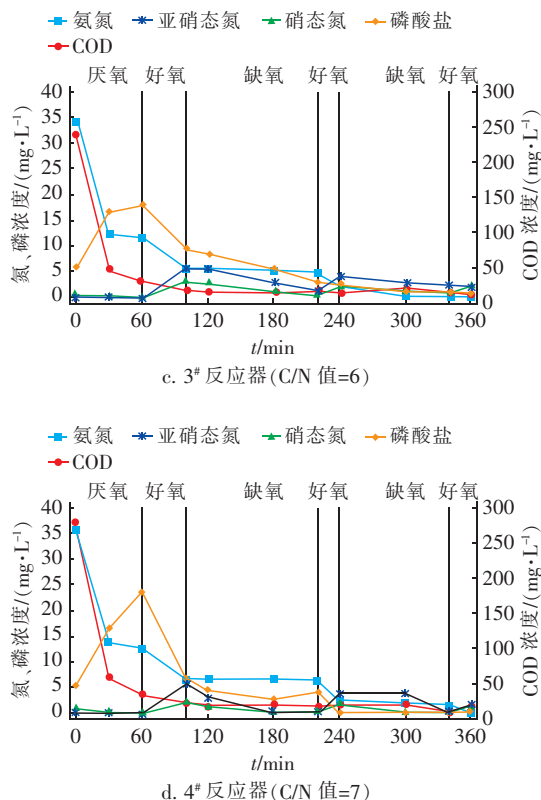


图3 C/N值对典型周期内氮、磷去除规律的影响

Fig. 3 Effect of C/N ratio on nitrogen and phosphorus removal during typical operation period

随后进入好氧阶段(60~100 min),该阶段DO浓度维持在2~3 mg/L,各反应器中的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度随曝气时间的增加逐渐下降,在40 min的好氧阶段,进水C/N值为4、5、6、7的反应器的氨氧化速率分别为4.15、8.69、9.39、8.77 mg/(L·h)。进水C/N值为4的反应器中氨氧化速率明显低于其他反应器,硝化过程明显受到抑制,分析认为,在该反应器运行过程中,存在 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 累积现象[见图3(a)],由于 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 对微生物具有一定的抑制作用^[8],从而抑制了系统的硝化效率;另外,除了自养硝化菌以外,系统中可能还存在异养硝化菌^[9],在进水C/N值为4的反应器中,由于碳源的缺乏,异养硝化过程受到抑制。同时,随着碳源的增加,在40 min的好氧阶段, $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 的吸收量也逐渐增加,进水C/N值为5、6、7的反应器对 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 的吸收量分别为6.33、8.44、16.87 mg/L。在生物除磷系统中,聚磷菌厌氧释磷量越多,好氧吸磷量也就越多^[3],进水碳源的增加促进了厌氧释磷,进而也促进了好氧吸磷。

在缺氧阶段(100~220 min),DO浓度低于0.5 mg/L,系统液相中的COD浓度均低于30 mg/L,短时曝气系统主要依靠细胞内碳源实现反硝化过程。缺氧阶段结束时,在进水C/N值为4、5、6、7的反应器中,剩余 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度分别为3.89、0.67、0.48、0.28 mg/L, $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 浓度分别为4.03、2.41、1.42、0.20 mg/L。随着进水C/N值的增加,反应器中的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 浓度逐渐降低。分析认为,进水中碳源越多,就有更多的碳源被储存为细胞内碳源,可为反硝化提供更多的碳源,进而使系统中剩余的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 维持在较低水平。

在随后的好氧阶段,氮、磷浓度变化规律与前期的好氧阶段类似。在随后的缺氧阶段结束时,进水C/N值为4、5、6、7的反应器中,剩余 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度分别为4.52、3.29、1.28、0.32 mg/L, $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 浓度分别为4.59、3.58、2.68、0.19 mg/L。分析认为,系统缺氧段的反硝化过程主要由内碳源完成,在该缺氧段,系统的内碳源量明显少于前期的缺氧段,因此,系统的反硝化能力明显减弱。在反应结束时,进水C/N值为4、5、6、7的反应器中,出水TN浓度分别为15.68、6.73、4.54、2.39 mg/L,出水TP浓度分别为4.66、2.21、1.01、0.09 mg/L。总体而言,随着进水C/N值的增加,短时曝气SBR系统表现出更高的脱氮除磷效率。

3 结论

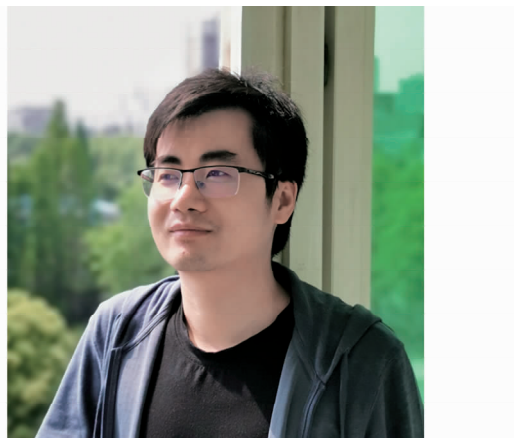
① 进水C/N值对短时曝气SBR系统的脱氮除磷效能影响显著。在进水C/N值为4、5、6、7的反应器中,氨氮平均去除率分别为83.3%、99.3%、99.4%、99.5%,TN平均去除率分别为58.8%、82.6%、88.1%、93.8%,TP平均去除率分别为14.6%、54.5%、76.6%、97.5%。随着进水C/N值的增加,系统的生物脱氮除磷效能逐渐增强。

② 短时曝气SBR系统表现出较强的脱氮除磷效能。在温度为25℃、SRT为40 d、进水C/N值为7时,系统出水COD、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TN、TP平均浓度分别为18、0.20、2.46、0.13 mg/L,COD、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 与TP指标满足地表水Ⅳ类水质标准,TN指标接近地表水Ⅴ类水质标准。

参考文献:

- [1] 何伶俐,汪勇,黄皓,等. 江苏太湖流域污水处理厂一级A提标改造技术总结[J]. 中国给水排水,2011,27

- (10):33-39.
- He Lingjun, Wang Yong, Huang Hao, *et al.* Summary of technical innovations for upgrading and retrofitting of MWWTPs for first level A criteria in Taihu Lake Basin of Jiangsu Province[J]. *China Water & Wastewater*, 2011, 27(10):33-39(in Chinese).
- [2] 王阿华. 城镇污水处理厂提标改造的若干问题探讨[J]. *中国给水排水*, 2010, 26(2):19-22.
- Wang Ahua. Discussion on some problems in upgrading and reconstruction of municipal wastewater treatment plant[J]. *China Water & Wastewater*, 2010, 26(2):19-22(in Chinese).
- [3] 张红. 应用反硝化除磷技术处理广州城市污水的试验研究[D]. 广州:广州大学, 2007.
- Zhang Hong. The Study on Denitrifying Phosphorus Removal from Municipal Wastewater in Guangzhou Region [D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2007 (in Chinese).
- [4] 陈立, 李成江, 郭兴芳, 等. 城镇污水处理厂提标改造的几点思考[J]. *水处理技术*, 2011, 37(9):120-122, 135.
- Chen Li, Li Chengjiang, Guo Xingfang, *et al.* A few of considerations on upgrading WWTPs to meet more stringent effluent requirements[J]. *Technology of Water Treatment*, 2011, 37(9):120-122, 135(in Chinese).
- [5] 王滢, 程洁红. 城镇污水处理厂脱氮除磷技术现状分析[J]. *江苏理工学院学报*, 2017, 23(4):72-77.
- Wang Ying, Cheng Jiehong. Technical status analysis of nitrogen and phosphorus removal in municipal wastewater treatment plant[J]. *Journal of Jiangsu University of Technology*, 2017, 23(4):72-77(in Chinese).
- [6] 许德超, 陈洪波, 李小明, 等. 静置/好氧/缺氧序批式反应器(SBR)脱氮除磷效果研究[J]. *环境科学学报*, 2014, 34(1):152-159.
- Xu Dechao, Chen Hongbo, Li Xiaoming, *et al.* Biological phosphorus and nitrogen removal in a sequencing batch reactor (SBR) operated in static/aerobic/anoxic regime [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, 34(1):152-159(in Chinese).
- [7] 郭海燕, 郭桢, 柳志刚, 等. 不同曝气强度下 SBMBBR 和 SBR 脱氮除磷性能对比研究[J]. *环境科学学报*, 2012, 32(3):568-576.
- Guo Haiyan, Guo Zhen, Liu Zhigang, *et al.* Characteristics of nitrogen and phosphorus removal in SBR and SBMBBR with different aeration rates [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, 32(3):568-576(in Chinese).
- [8] Ge S, Wang S, Yang X, *et al.* Detection of nitrifiers and evaluation of partial nitrification for wastewater treatment: A review[J]. *Chemosphere*, 2015, 140:85-98.
- [9] Wang J, Gong B, Wang Y, *et al.* The potential multiple mechanisms and microbial communities in simultaneous nitrification and denitrification process treating high carbon and nitrogen concentration saline wastewater[J]. *Bioresour Technol*, 2017, 243:708-715.



作者简介:龚本洲(1990-),男,湖北监利人,博士,主要从事废水处理理论与技术研究。

E-mail:635878495@qq.com

收稿日期:2019-09-10

河长制,河长治